水文学の課題と未来：学際研究と超学際研究の視点から

谷口 真人^{1*}

Challenges for future hydrology: From the view points of interdisciplinary and transdisciplinary studies

Makoto TANIGUCHI

Abstract

Challenges for future hydrology were reviewed from the view points of interdisciplinary and transdisciplinary studies. Interdisciplinary studies on hydrology were categorized into 1) connections between adjunct disciplines because of seamless movement of water, and 2) integrated understanding of hydrology with different discipline. Transdisciplinary studies on hydrology were discussed in terms of “Future Earth (International research platform for global sustainability)” and “Panta Rhei (International Association of Hydrological Society)” as well as the strategic research agenda on hydrology, to solve the “wicked problems” as co-design, co-production and co-delivery for the sustainable society. Challenges for future hydrology were discussed from the view points of system knowledge, target knowledge and transformation knowledge. Regarding the system knowledge, the nexus including water beyond the interaction, and water footprint with sustainability indices are keys as the center of the information and process among nature, society and humanity. Backcast scenarios and future design are important for the target knowledge. Transformation knowledges are related to human behavior changes and technological innovations. Natural and social tipping points, regime shifts and resilience are keys for the future hydrology and the sustainable society.

Key words: Science in society, Transdisciplinary, Strategic research agenda, Future earth, Nexus

I. はじめに

水文学は、「地球の水を扱う科学、その発生、循環、分布、その物理的および化学的特性、またそれら特性の人間活動への反応を含めての物理的および生物的環境との相互作用を扱う科学である。すなわち水文学は地球上の水のサイクルのすべての歴史をカバーする分野である」とユネスコIHD (International Hydrological Decade) で定義されている (風間, 2011)。近代科学としての

水文学の歩みを見ると、ダルシー則 (Darcy, 1856) やレイノルズ相似則 (Reynolds, 1898), マニング式 (Manning, 1889) に見られるように、19世紀後半に主に水理学の分野から、特に水の物理量の評価に関する研究の体系化が最初に始まった。これらは次に、水循環プロセスの一部としての浸透能理論 (Horton, 1933) や地下水流動系 (Tóth, 1963; Freeze and Cherry, 1979) などの概念の構築、及びその定量化として進展した。そして現在の水文学の教科書に見られるよう

1 総合地球環境学研究所 Research Institute for Humanity and Nature

* 責任著者

な、各水体（河川水・地下水・土壌水・湖沼水・降水など）毎の知見が、各プロセスの理解とともに蓄積していった。

このような水の物理量に関する研究に次いで、水の化学的研究としての水質研究が、水汚染問題の発生と関連した研究として進展していった。点源汚染としての工場廃棄物などによる公害型水質汚染や、塩水化やヒ素汚染など、原因となる物質は自然由来ではあるが、問題を引き起こす要因が人間活動である水質汚染問題から、農業活動に由来する面源汚染としてのグローバルな窒素汚染 (Gruber and Galloway, 2008) まで、空間スケールを拡大しながら、人為起源の汚染による水質研究が拡大・進展していった。また、この水量・水質の研究に次いで、それらが生態系に与える影響評価が、沿岸域における赤潮などの富栄養化研究、河川における水生動植物研究、地下水依存の生態系研究などとして次に研究対象となった。このように物理学・化学・生物学的な観点からの水文学研究が、自然科学としての水研究として、先行して行われていったのが近代科学としての水文学の歴史と言える。

一方、社会科学的水研究としては、経済学や政治学、法学的な観点からの研究が進められてきた。経済的な評価では、コスト便益法や、支払い意思額での評価など、様々な経済学的手法を用いて、水に関連する諸現象の経済的価値を評価する研究が進められている。また貿易を通じた水の移動を概念的に示す「仮想水（バーチャル・ウォーター）」なども、社会科学的水研究として注目を集めてきた。さらに水の管理に関しては、資源としての水のコモンズ論 (Hardin, 1968) から水の公共性 (Ostrom, 1990) への議論・研究が進展した。特に最近では、持続可能性 (Sustainability) 研究と関連して、社会科学的水研究の重要性が増してきている。これもグローバル化という人間活動の拡大による空間スケールの拡大と、それに伴う影響範囲の拡大が、その理由と言える。社会のグローバル化が物や情報の移動によって拡大し、それらを通して価値観のグローバ

ル化と均質化が進行し、ローカルな空間スケールでの多様な価値観に基づく、多様な水文化への影響懸念に対する研究も進められつつある (谷口, 2011)。さらに人文科学的な水文学研究としては、行動心理や価値観などに基づく水管理や水利用の違い (Castilla-Rho et al., 2017) など、広い意味での文化の問題としての水文学研究が、今後、より重要性を増してくると考えられる。

このように、自然科学・社会科学・人文科学と、学問のあらゆる分野との繋がりのある水文学は、水が自然界を循環することで、様々な自然科学分野とのつながりが生まれ、人と生業及び社会に必要な資源として、様々な人文社会科学分野とのつながりが生まれている。このことは、限られた地球という自然環境と、豊かさを希求する人の特質 (人文環境) 及びそれを支える社会環境を踏まえて、これからの水文学が、持続可能な地球・地域社会の構築という共通目標に向けた重要な研究領域として、改めて位置付けられることを意味している。

以上のように水文学は、自然科学としての水の量 (物理)・水の質 (化学)・生態系への影響 (生物) から、社会科学としての政治学・経済学・法学、そして人文科学としての心理学や認知行動科学、価値や広い意味での文化まで、幅広い研究領域をカバーしている。そして、水文学の研究課題は、個別学問分野 (discipline) としての課題に加えて、他領域分野との「学際 (Interdiscipline) 研究」や、非研究者との共同研究としての「超学際 (transdiscipline) 研究」と、その範囲は拡大し続けている。本報告では、これまでの水文学の進展を踏まえて、今後の水文学の課題と将来の課題についてまとめて見たい。

Ⅱ. 学際研究としての水文学

学際研究としての水文学研究には、大きく2つの種類がある。第1の学際研究は、水蒸気、河川水、土壌水、地下水、海水、雪氷といった異なる水体ごとに細分化していった学問分野の境界にお

ける研究課題である。陸上の液体としての水を主に扱う水文学に対して、水蒸気としての水を扱う気象学との境界における「学際研究」や、淡水としての水を陸上で扱う水文学と、海水としての水を海洋で扱う海洋学との境界における「学際研究」などがこれに相当する。これらはシームレスに地球上を循環している水を扱う研究分野が、水体ごとに細分化していったことによる学術としての不連続性を埋める意味がある。一方、第2の学際研究は、同じ水文現象を異なる個々のdisciplineから解釈・分析し、それらを統合的に評価するものである。例えば、水質汚染に関わる水文学的課題を、経済学的な解釈と環境影響としての評価の両方を持ち寄り、お互いを補完し、理解を深化しながら全体を評価する内容などがこれに相当する。これら水文学の学際研究は、気象学・海洋学などの自然科学分野だけではなく、経済学や文化人類学、法学など人文社会学との共同研究が行われるようになって久しい。

第1の学際研究の例としては、水文学と測地学及び気象学との学際研究として、衛星GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) による地下水貯留量変化研究の例がある (Tapley et al., 2003)。それまではグローバルに評価ができなかった陸水貯留量が、絶対値の評価ではないが、変動値として初めて評価可能となった。空間解像度は100 km スケールと粗いが、時間解像度は当初の月単位から解析精度を上げることで週単位まで改善されてきており、上空の水蒸気から陸上の表流水、地下の地中水の積算値の変動量として、その陸水貯留変動量が評価できるようになった。GRACE衛星自体は、もともと測地学と気象学分野の合同で設計されたが、陸上でのバリデーション (現場検証) には水文学が大きく貢献し、「衛星水文学」の一角を担うテーマと言えるまで、研究者コミュニティの間に浸透した。これは、新しい測定技術 (衛星GRACE) が、学際研究として測地学・気象学と水文学を結びつけた例と言える。

また水文学と地球熱学及び気象学との学際研究

になってきたのが、「地下温暖化」現象である (Taniguchi, 2011)。これも第1の学際研究の例である。温暖化に伴う影響評価は様々な分野で行われてきたが、この地下温暖化も、当初は温暖化の影響を受けて温度上昇した地下温度鉛直分布から、逆解析を用いて気候変動の復元を行うという、気候変動研究の一部としてスタートした (Huang et al., 2000)。その後、地下温度上昇そのものに研究が移り、地下温暖化の影響による土壌中の微生物活動に関する研究や (Knorr et al., 2005)、温度上昇した地中熱の熱利用 (Zhu et al., 2010) などに発展している。こちらはシームレスに循環する水と熱の循環を通して、学際研究が進展した例と言える。

さらに水文学と沿岸海洋学との学際研究として研究が進んだのが「海底湧水研究」であり、これも第1の学際研究の一つである (Taniguchi et al., 2002; Burnett et al., 2003)。これは地下水学の伝統的な「塩水化研究」の裏返しとして、それまでは陸域の水問題のみを扱ってきた水文学が、海域への陸水の影響評価も含めて、海洋学と共同で行われた学際研究である。この評価には、水文学的駆動力と海洋学的駆動力の両者を評価する必要がある、両学問分野の知見が合わさって初めて研究の進展が見られた学際研究の一つである。最近では、海域への地下水流出に伴う栄養塩の流出と、海洋一次生産から水産資源に至る繋がりとの研究が進展してきている (谷口, 2017; Sugimoto et al., 2016)。こちらはシームレスに循環する水と物質の循環を通して、学際研究が成立した例である。

第2の学際研究の例としては、アジア・メガシティにおける水文学と経済学及び社会学の学際研究による、都市の発達段階と水利用及び環境変動に関する研究がある (Taniguchi, 2011)。地盤沈下が進行中の2010年代前半のジャカルタでは、公式統計資料の17倍の揚水量を想定しないと、実際の地下水位変動を説明できないことが、地下水流動数値モデルと社会経済指標を用いた研究で明らかになっている (Kagabu et al., 2013)。こ

れは、現地での生活環境を考慮した水利用形態をもとにした経済学的評価なしでは説明できないものであり、第2の学際研究の例といえる（谷口，2014）。

また、宗教を含む人文・社会科学と水文学の学際研究の例として、バンコクでの寺の立地と信仰心に関する研究がある。地域の人々によって献上された土地に建つお寺は、軟弱地盤の中でも比較的良い地盤（若干標高が高い・砂質で透水性がよい）に建っており、微小流動系としての地下水流出が起きやすい。この地下水流出のシグナルを、運河での水質調査から明らかにし、その原因がバンコクに住む人々の宗教心と関連があることを明らかにした例（谷口，2014）は、第2の種類の学際研究の一つである。

このほかにも、水循環基本法（2014）及び水循環基本計画（2015）と関連して議論されている「水の公共性」についての考え方は、地下水の過剰揚水による地盤地下に代表される「共有地（共有資源）の悲劇（Hardin, 1969）」を超えて、コモンズ論（Ostrom, 1990）でいう公共資源の発展形として捉えることができる（谷口，2015）。これも、法学や文化人類学と水文学による、第2の学際研究の成果と言える。

なおこの他にも、水文地形学や水文地質学などの第1の学際研究や、地震、豪雨、火山噴火などの自然災害と関連した第2の学際研究としての水文学研究は、持続可能な地球・地域社会の構築という共通目標に向けて、重要な研究をこれまでも行っており、災害多発地域におけるレジリエント（回復力のある）な社会の構築にとって重要である。

Ⅲ. 超学際研究としての水文学

水体ごとの研究及びdisciplineごとの研究や、上述の2種類の学際研究に加え、研究者以外の関係者との共同研究としての超学際研究（transdisciplinary studies）が、フューチャー・アース（日本学術会議，2014）や、国際水文科学協会（IAHS）のパンタレイ（万物は流転する，Mon-

tanari et al., 2013）で始まっている。なお日本学術会議は「科学者コミュニティが科学者以外の社会の様々な関係者と連携・協働して、新たな智の創出を行う研究と実践活動」を総称して、「超学際研究」と定義している（日本学術会議，2014）。

持続可能な地球社会の構築のための研究プラットフォームである「フューチャー・アース」は、ICSU（International Council of Science Union）などの国際学術団体や、国連組織、研究資金提供団体などが、2015年から10年計画で研究の推進を行っている。ここでは、プラネタリー・バウンダリー（Rockström et al., 2011）で示された地球の限界と、豊かさを希求し続ける現在の社会において、持続可能な開発目標（SDGs: Sustainable Development Goals）が国連で採択されるなど、持続可能な社会の構築に向けた研究が推進されている（Fig. 1）。このフューチャー・アースは、これまでの地球環境研究（Global Environmental Change studies）に、持続可能な開発目標、持続可能性研究（Sustainability science）を加え、研究者と非研究者が研究の協働企画（co-design）を行い、研究の協働実施（co-production）と協働実装（co-delivery）を行う、課題解決型の国際共同研究のプラットフォームである。

超学際研究は、知識の共有と価値の合意が難しい地球環境問題のような「厄介な問題（wicked problems）」に対して、知識の統合と問題解決を志向する枠組みである。特に3つの知；システム知（system knowledge）、目標を定める知（target knowledge）、持続可能な社会への転換のための知（transformation knowledge）の欠如が、複雑で利害関係の大きな「厄介な問題」の解決を阻害しているとの認識のもと、超学際研究の試みがおこなわれている。地球環境と持続可能な社会を俯瞰し、人間開発指標（Human Development Index; HDI）と、環境負荷（Ecological Footprint; EF）の関係性を考慮した上で、disciplinary, interdisciplinary（学際）、transdisciplinary（超

Fig. 1 Framework of hydrology for sustainable society (1) planetary boundary, (2) global development, (3) transformation toward sustainability.

学際) 研究としての水文学が果たすべき役割は大きい。

フューチャー・アースは、近代科学で細分化された学問体系では問題の解決が困難な、温暖化や生物多様性の減少などの「厄介な問題」に対して、自省・再帰的な姿勢で各自の専門内容をも再検討し、縦割り・蛸壺になりがちな社会や学術の構造を見直すことで、課題解決につなげる取り組みともいえる。この「厄介な問題」は「事実が不確かで、価値が問われ、利害が大きく、決定が急がれる (Funtowicz and Ravetz, 1992)」という特徴を持っており、「超学際研究が必要となるのは、社会的に重要な問題に関する知識が不確かで、問題の具体的な性質が問われ、問題に影響を受ける人々と問題を扱う人々の利害が大きいような場合である (Pohl and Hirsch Hadorn, 2007)」とも言える。このような、複雑で多様な原因を持ち、結果が不明で社会的に複雑であり、多分野が関わるような「厄介な問題」の解決には、これまでは研究者のみが携わってきたと考えられがちな知識生産に、研究者以外の関係者も加わるという「知識生産の民主化」と、これまでの法・社会制度には馴染みにくかった「予防原則の社会実装」を進めることが重要である (谷口, 2018)。

水文学分野におけるこの超学際研究の展開と

しては、国際水文学協会 (IAHS: International Association of Hydrological Sciences) のパンタレイ (Montanari et al. 2013) が、2013年から2022年までの10年間を、「Panta Rhei—Everything Flows. (パンタレイ—万物は流転する)」と位置づけ、水文学と社会の変化に関する研究活動に取り組んでいる。パンタレイでは、フューチャー・アースプラットフォーム構築の前段階で議論された、我々が得るべき3つの知 (system knowledge, target knowledge, transformation knowledge) に相当するものとして、理解 (Understanding), 推定と予測 (Estimation and prediction), 実践科学 (Science in practice) の3つをターゲットとして掲げており、この超学際研究の枠組みを、水分野の国際学術団体がいち早く取り入れたことは特筆に値する。

この様な中で Lang et al. (2012) は、超学際研究における科学と社会との関係性についての概念モデルの提示を行なった。まず研究課題としては「社会の課題」と「科学の課題」の両者を提示し、その課題解決に向けた共同研究を社会と科学が実施し、社会への実装においても社会と科学が共創する形を提示した。これらは Future Earth の Co-design, Co-production, Co-delivery に通じる。

この Lang のモデルは、愛媛県の西条市の水問

Fig. 2 Science in Society (water problems and studies at Saijo city, Ehime prefecture).

題を例にすると以下ようになる (Fig. 2)。西条市では、流域を超えた松山市への水の供給 (越境水) の計画をきっかけに、西条市の地下水・湧水 (うちぬき) の涵養源である加茂川からの地下水涵養量を含めた詳細な調査と、地下水モデルによる評価が行われた。ここでは「越境水問題」が社会の課題であり、地下水涵養を決める「河川水と地下水の交流」が自然科学の課題、河川水と地下水で管理が異なる「コモンズとしての水の管理制度の不具合」が人文社会学的な課題である。そして科学の課題 (河川と地下水との交流) と社会の課題 (越境水) を解決するために、市民が瀬切れ (河川水と地下水の交流) の状況を写真に撮り (社会側の研究)、それを地下水モデルに反映させる (科学側の研究) 共同研究が行われた。その結果、うちぬきの水位を下げることなく他地域への越境水の供給を可能にする (社会の課題の解決へつながる) 最低限の加茂川河川水量が明らかになり (自然科学の課題解決)、条例制定を含めた水の管理制度に対する知見を得ることができた (社会科学の課題解決)。このように社会の中の科学としての水文学は、社会と科学の双方の課題設定・共同研究・課題解決につながる枠組みを提供できる。

IV. 戦略的研究課題の抽出

水文学が果たすべき持続可能な社会への転換に向けた研究を考える上で、グローバルサステナビリティの研究プラットフォームである Future Earth が行なった戦略的研究課題の抽出 (SRA: Strategic Research Agenda) や、JST-RISTEX フューチャー・アース構想の推進事業「日本が取り組むべき国際的優先テーマの抽出及び研究開発のデザインに関する調査研究 (JSRA: Japan Strategic Research Agenda)」 (総合地球環境学研究所, 2017) が参考になる。そこでは、研究者と研究者以外のステークホルダーとの共創によるサザランド方式 (Sutherland et al., 2006) をとり、Co-design による課題抽出を行なっている。

JSRA では、さまざまなステークホルダーから地球環境問題に関する課題を集めるため、市民とのグループインタビュー、行政や産業界へのインタビュー、研究者・有識者へのオンラインアンケート等を行い、645 の研究課題候補を収集した。そしてそれらの研究課題候補を元にして、2016 年 1 月に JSRA ワークショップを開催し、そこでは行政、NPO、産業界などの関係者と各分野の専門家約 40 名が集まり、これから日本が特に優先して研究すべき課題は何か、2 日間にわたって議論や投票、グループワークを行い、約 107 の研究課題を抽出した上で 10 のテーマに分類した (総合地球環境学研究所, 2017, Fig. 3, Fig. 4)。

JSRA では SRA にはない特徴的な課題群である「地域社会」や「環境と文化」などが抽出されており、107 の研究課題の中にも水文学に関連するテーマが多く見られた。都市と農村を一体として捉える研究や、健康と環境の関係など、これまではあまり関連していなかったと思われる領域をつなぐ課題 (第 2 の学際研究にもつながる課題) を、一連の現象として捉えた方がより解決につながるという考えのもとでの課題抽出が見られた。水文学に関しても、研究者だけが研究課題を議論するのではなく、非研究者との共創が、地球環境

Fig. 3 Japan Strategic Research Agenda (JST/RISTEX).

JSRA 10 課題

1. 食料の持続的な生産・加工・流通・消費
2. 温暖化の予測・影響・適応・緩和
3. 生物多様性と生態系保全
4. 地球環境の変化がもたらす健康への影響
5. 持続可能なエネルギー・資源の開発・アセスメント・管理・イノベーション
6. 持続可能な地域社会
7. 都市と農村の相互作用
8. 開発や経済の発展と環境保全の両立
9. 環境と文化、ライフスタイル、価値
10. リテラシー・対話・意思決定

Fig. 4 Ten themes of JSRA.

問題のような課題解決型で利害関係が複雑な問題には重要になる。

例えば、「課題2：温暖化予測・影響・適応・緩和」では、「地球温暖化の水資源への影響は何か」や「温暖化と土地・水・陸域及び海域の生態系の変化との相互作用は何か」などが抽出されており、「課題7：都市と農村の相互依存」では、「都市への人口集中に伴うヒートアイランドや都市型水害などの環境・社会・経済の問題をどのように解決するか」が課題として抽出されている。

また「課題10：リテラシー・対話・意思決定」では「土壌・水質・大気汚染などが起こった際の風評被害を防ぐには、どんな情報とデータが必要か」が抽出されており、いずれも、水問題単独ではなく、他の地球環境問題・持続性社会問題と関連した課題として抽出されている。

さらにこのJSRAの成果は、2017年2月4日に一般公開のシンポジウム「わたしたちがえがく地球の未来（フューチャー・アース）—持続可能な地球社会へ向けて—」の中で、選ばれた研究課題を市民の視点から再度見直すことも行われた。これがフューチャー・アースという、自省的・再帰的な姿勢であり、専門家（研究者・行政者・技術者・メディアなどのエキスパート）の持つ専門内容をも再検討し、縦割り・蝸壺になりがちな社会や学術の構造を見直すことで、課題解決につなげる取り組みの一例といえる。

その結果、専門家（研究者を含むエキスパート）が重要と思う課題と、市民が重要と思う課題に違いが見られる部分もあり、上述の水問題では、地球温暖化課題2の「温暖化と土地・水・陸域及び海域の生態系の変化との相互作用は何か」は専門家がより重要であると判断しているのに対し、リテラシー課題10の「土壌・水質・大気汚染などが起こった際の風評被害を防ぐには、どん

な情報とデータが必要か」は、市民がより重要であると判断していることなども明らかになっている（総合地球環境学研究所，2017）。

V. 水文学の課題と未来

水文学のこれまでの研究の系譜を踏まえ、今後どのような観点・姿勢で、水文学研究を進めていくべきか、限られたレビューからの提案ではあるが、3つの視点から以下にまとめて見たい。

まず1つ目は、システム知（system knowledge）の構築につながる水文学研究である。温暖化のモデルに関して、自然要因及び人間要因の軸とモデルの統合性の軸からまとめたMoss et al.（2000）や、他の多くの学際研究の例を見ると、水は様々な現象と関連し、現象のつながりのネットワーク拠点を形成しており、情報の中心とも言える存在である（榎根，2015）。水が他の自然現象、社会現象、人の特質とどのように関連しているかということを明らかにする「システム知」の構築は、これからの水文学にとっての重要な観点の一つ目である。

その中で、水文学研究がシステム知のさらなる獲得・拡充を目指すには、「陸水と大気」や「水と経済」と言ったこれまでの2項問題の関係性を超えて、それら以外の関係要因を加えた要素の検討が、複雑な地球環境問題等の解決と持続可能な社会の構築にとって必要になる。例えば、水、エネルギー、食料の各資源は、水の輸送及び生産のためのエネルギー消費や、食料生産のための水の消費など、お互いに影響を与え合う「人と社会の生存基盤」としての資源であり、それぞれの資源が他の資源を消費して生産される関係にもあることから（Fig. 5）、水・エネルギー・食料ネクサス（連関）として扱う重要性が指摘されている（谷口，2018）。この関係性は、水・エネルギー・食料の3つの資源のネクサスばかりでなく、気候変動や土地利用との連関（ネクサス）や環境と経済との連関（ネクサス）も強い。これらのネクサスにはトレードオフ（二律背反）とシナジー（相

Fig. 5 Water-Energy-Food Nexus.

乗効果）があり、それらの評価が、持続可能な社会のための水文学には必要であろう。気候変動や貿易、経済や環境など、ネクサス構造を変える様々な要素が存在する一方（van Vliet et al., 2016）、逆にネクサス構造が変わることで、その結果として影響を受ける要素も数多くある（Yamada et al., 2017）。これらを総合的に分析し、それぞれの地域と地球にとってのネクサスのあり方を示すモデルと社会のシステム作りが必要である。さらに各資源には、生産・輸送・分配・消費などの各プロセスがあり、それぞれのプロセスで、トレードオフやシナジーを評価する必要がある（谷口，2018）。

システム知の一つであるウォーターフットプリントの概念も、最近では持続可能性概念と結びつき（Gleeson et al., 2012等）、非再生可能地下水（化石水）による農作物（食料含）の輸出入（貿易）として議論されている（Dalin et al., 2017）。アジア地域でも、パキスタン・インドでは非再生可能地下水（化石水）による食料輸出がある一方、日本・中国では非再生可能地下水（化石水）による食料輸入があり、持続可能ではない地下水利用の原因と結果が、アジアの中で混在していることが、システム知の一つとして明らかになっている。

水・エネルギー・食料ネクサスにおける「トレードオフ」は、一方の資源の生産や輸送のために他の資源を消費してしまう関係をいうが、水・

エネルギー・食料ネクサスの「シナジー効果」の例は、70万人の水資源を100%地下水に依存する熊本市（嶋田・上野，2016）において典型的である。熊本では上流域の水田（稲作）からの地下水涵養と、人工的なエネルギーを要しない自然の地下水流下による下流域への水輸送形態により、水・エネルギー・食料ネクサスの「シナジー効果」が存在した。それが、上流域における減反政策による休耕田の増大と、都市化に伴う非透水面の拡大による地下水涵養量の減少により、下流域の熊本市での水資源の減少をもたらした。このことは、減反政策と都市化がこの地域の水・エネルギー・食料ネクサスのシナジー効果を減少させたともいえる（谷口，2018）。このようなネクサスのトレードオフとシナジーの評価は、水・エネルギー・食料ネクサスに限らず、環境と経済の連関を含めた持続可能な社会のための今後の水文学研究にとって、重要となるであろう。

2つ目は、目標を定める知（Target knowledge）の構築のための水文学研究である。持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals（SDGs））をはじめ、社会が持続可能であるための目標を定めることは容易ではない。特に様々な価値観と大きな利害関係がある、地球環境問題などの厄介な問題（wicked problems）では、どのように目標を定めれば良いのかという方法論自体がまだ存在しない。現状から出発して様々な予測シナリオを立て、社会生態モデル等を用いて将来予測を行う「フォアキャスト」に対して、将来のあるべき姿を想定し、そこに至る道筋を「バックキャスト」するには、このtarget knowledgeの獲得が不可欠である。シナリオ策定のあり方自体や、利害関係者の関係性分析など、前述の超学際研究としての取り組みが既に始まっている（馬場ほか，2015）。

この目標を定める知（Target knowledge）の例としては、前出の「うちぬき」自噴井で有名な愛媛県西条市で行われた超学際研究が挙げられる。そこでは、西条市から松山市への水の供給（越境水）計画をきっかけに、行政・産業界・市

民・研究者等による10年以上に及ぶ様々な協働の取り組み（超学際研究）が行われた。地域の象徴（アイコン）としての「うちぬき」を守るために、地下水は地域の公共資源（地域公水）であるという理念を掲げ、うちぬき井戸の水位を維持し塩水化を防止するために、市民も協働した地下水調査と、様々なシナリオに基づく数値シミュレーションによる予測が行われた。その結果、伏没水による地下水涵養をもたらす加茂川の上流域で、毎秒3.5トン以上の河川流量があれば、うちぬきの水位低下と塩水化が起こらないことを明らかにし、それを超える河川水量は越境水として他地域への配水が可能であるとした。ここでは、地下水を公共の資源と位置づける「理念」と、地下水位の維持・塩水化防止を「目標」とし、バックキャストとしてどのような水資源の利用・管理が可能かを、「数値目標」とともに明らかにした。このように目標（target）にも階層性があり、理念・目標・数値目標といったように、問題や課題と目標の構造化を行い、それぞれの段階でのtargetを設定する知の獲得のための研究が必要となる。

このtarget knowledgeを獲得するための手法の一つとして、将来世代の意思を現在の意思決定に生かす方法論の構築が「フューチャー・デザイン」として試みられている（西條，2015）。フューチャーデザインでは、市町村行政などの将来計画作成等において、現在世代だけではなく将来世代の意見を汲み取るため、将来世代（将来世代のキャップ（帽子）をかぶり将来世代になりきることで、現世代人に将来世代を代弁させる）との熟議を行うことで、フォアキャストではなくバックキャストの要素を取り入れられる可能性が指摘されている。このような取り組みは、利己性と利他性の社会実験などでも取り上げられ、その可能性が議論されている。水の研究においても、特に地下水は滞留時間の長い水文現象であり、持続可能な水資源利用という観点からは、将来世代を含むより長期の視点が必要となる。

3つ目は、持続可能な社会への転換のための知（Transformation knowledge）の構築のための水

文学研究である。これまで環境（自然科学）と社会（社会科学）に偏りがちだった水研究に加え、認知科学・行動科学・行動心理学など、人（人文）に関する水の研究が、持続可能な社会に向けての水研究の大きなテーマの一つとして取り上げられるであろう。例えば、アメリカ、インド、オーストラリアで、地下水位低下という同じ現象が発生した時に、農家や水管理団体がどのような行動を取るのかということは、それぞれの水に対する考え方の違いを含む制度や水文化に依存する（Castilla-Rho et al., 2017）。このような行動科学・行動心理学などは、経済や環境のインセンティブによる行動変化を通して、社会変容へと繋がる可能性がある。

一方、社会転換のもう一つの大きな要素としては、技術革新がある。技術革新による社会転換には、例えばオイルショック後の省エネ技術の革新による社会動向の変化（省エネルギー社会化）などがある。またITや医療分野に見られる新技術による社会の転換なども、いわゆる技術イノベーションによる社会の転換の例である。水分野でも、地下水揚水技術の革新や点滴灌漑技術など、水資源開発の技術革新が、農作物生産などの拡大を通して、社会の変化に大きく貢献してきた。一方で、新しい掘削技術の開発によるシェールガス利用の開始は、地下水汚染（Holding et al., 2017）や、水・エネルギー・食料ネクスス問題（Taniguchi et al., 2017）など、環境と開発経済における新たな問題をもたらす要因にもなっている。

資本主義を起点の一つとする「利己性・個人主義」の拡大は、本来、人が持つ「利他性や公共性」などを萎縮させ、社会の中での「信頼」関係構築の阻害要因になる。この信頼関係がどのように構築され、それが社会の転換にどのようにつながるのかも、持続可能な社会へのtransformation knowledgeの一つである。水の分野では、農作物中に含まれる安定同位体などのトレーサーがもつ特性を、産地特定・起源の判定などを通して、生産者と消費者の「信頼」関係をつなぐ道具として捉える研究が始められている（陀安,

2017）。このように「利他性」や「信頼」は、持続可能な社会へ向けての水の研究において、今後の重要な課題の一つである。

その際に、社会の転換が起こる閾値（Tipping point）がそれぞれの地域において、どこにあるかを見定めることは、持続可能な社会の構築にとって非常に重要な問題である。この閾値は、自然資本としての閾値（natural tipping point）ばかりでなく、社会資本としての閾値（social tipping point）についても議論がされ始め、お互いがどのように連関するのかなど、これからの大きな研究課題の一つとなるであろう。またこの閾値は、それを超えるレジームシフトや社会のレジリエンス（Rocha et al., 2015）とも関連して、transformation knowledgeに関するこれからの水文学研究にとっても重要となる。

VI. 終わりに

近代科学としての水文学は細分化と精緻化の方向に進む一方、学際研究としての水文学は、自然科学・社会科学・人文と結びついた共同研究が広がっている。学際研究には、シームレスに循環する水を扱う分野が、水体ごとに細分化していった学術の不連続を埋める学際研究と、同じ水文現象を異なる学術分野から統合的に捉える学際研究の2種類がある。水分野と各分野との繋がり（物理的な繋がり、経済的な繋がり、社会的な繋がりなど）と、その繋がり（強さ）に応じた学際研究の整理が必要であろう。

また持続可能な社会のための水文学には、限られた土地と気候変動のもとでの持続可能な水利用等、自然・社会・経済のトレードオフ（二律背反）や社会の対立とシナジー（相乗効果）を明らかにし、持続可能な社会への転換につながる研究が重要である。水研究には様々な課題に応じた入口があるが、情報の中心である水を中心にした社会設計と研究課題の構造化が重要である。

さらに超学際研究としての水文学は、社会の中の科学として利害関係者との協働企画（co-de-

sign) 等を進め、自省・再帰的姿勢を保ちながら、専門性も含めて再考することが肝要である。水文学の戦略的課題抽出 (Strategic Research Agenda for Hydrology) など、非専門家との協働が必要となる。オープンサイエンスが進む中、孤立的なサイロ (縦割りされた学問) としての水文学は成り立たない。個々人のエキスパートとしての専門性を活かし、課題やプロジェクト単位でのグループ化を行い、課題ごとに離合集散 (拡げて畳む) する研究のフレームの構築が必要である。

文 献

- 風間 聡 (2011) 『水文学』コロナ社〈土木・環境系コアテキストシリーズ〉, ISBN 978-4-339-05628-0
- 梶根 勇 (2015) 水文学の未来. 日本水文科学会誌, **45** (1), 17–19.
- 西條辰義 (2015) フューチャー・デザイン: 七世代先を見据えた社会. 勁草書房, 308 p.
- 嶋田 純・上野真也 (2016) 持続可能な地下水利用に向けた挑戦. 熊本大学政創研叢書9, 262 p.
- 総合地球環境学研究所 (2017) 日本が取り組むべき国際的優先テーマの抽出及び研究開発のデザインに関する調査研究 (JSRA). JST-RISTEX フューチャー・アース構想の推進事業報告書, 175 p. http://www.chikyu.ac.jp/activities/related/etc/fe_img/JSRA2016.pdf.
- 谷口真人 (2011) 地下水流動—モンスーンアジアの資源と流動—. 共立出版, 272 p.
- 谷口真人 (2014) 都市化と水環境の変化. 地球環境学マニュアル1 共同研究のすすめ. 朝倉書店, 14–17.
- 谷口真人 (2015) 水循環基本法と地下水. 地下水学会誌, **57** (1), 81–89.
- 谷口真人 (2017) 持続可能な社会に向けた地下水・湧水の学際・超学際研究. 小路 淳・杉本亮・富永 修編, 日本水産学会監修, 地下水・湧水を介した陸-海のつながりと人間社会. 水産学シリーズ, 185. 恒星社厚生閣, 11–26.
- 谷口真人 (2018) アジアにおけるエネルギー・水・食料の総合的確保—ネクサス研究の新展開. 学術の動向, **23** (2) (2018年2月号), 60–63.
- 陀安一郎 (2017) 環境研究における同位体を用いた環境トレーサビリティ手法の提案と有効性の検証. 総合地球環境学研究所コアプロジェクト, <http://www.chikyu.ac.jp/rihn/project/2017-03.html>. (2018.3.21 閲覧)
- 日本学術会議 (2014) Future Earth—持続可能な地球社会を目指して—. 日本学術会議フューチャー・アースの推進に関する委員会, 11 p.
- 馬場健司・松浦正浩・谷口真人 (2015) 科学と社会の共創に向けたステークホルダー分析の可能性と課題—福井県小浜市における地下水資源の利活用をめぐる潜在的論点の抽出からの示唆—. 環境科学会誌, **28** (4): 304–315.
- Burnett, W. C., Bokuniewicz, H., Huettel, M., Moore, W. S. and Taniguchi, M. (2003) Groundwater and pore water inputs to the coastal zone. *Biogeochemistry*, **66** (1–2), 3–33.
- Castilla-Rho, J. C., Rojas, R., Andersen, M. S., Holley, C. and Mariethoz, C. (2017) Social tipping points in global groundwater management. *Nature Human Behavior*, **1**, 640–649.
- Dalin, C., Wada, Y., Kastner, T. and Puma, M. J. (2017) Groundwater depletion embedded in international food trade. *Nature* **543**, 700–704.
- Darcy, H. (1856) In *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon: Exposition et Application des Principes a Suivre et des Formules a Employer dans les Questions de Distribution d'Eau*, Dalmont, V. (Ed.), Paris, 647 p.
- Freeze, A. and Cherry, J. (1979) *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 604 p.
- Funtowicz, S. O. and Ravetz, J. R. (1992) Three types of risk assessment and the emergence of post-normal science. In *Social Theo-*

- ries of Risk, Praeger, Krinsky, S. and Golding, D. (Eds.), 251–274.
- Glesson, T., Wada Y., Bierkens, M. F. P. and van Book, L. P. H. (2012) Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature* **488**, 197–200, doi:10.1038/nature11295.
- Gruber, N. and Galloway, J. N. (2008) An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*, **451**, 293–296.
- Hardin, G. (1968) The Tragedy of the Commons. *Science*, **162** (1968), 1243–1248.
- Holding, S., Allen, D. M., Notte, C. and Olewiler, N. (2017) Enhancing water security in a rapidly developing shale gas region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **11**, 266–277.
- Horton, R. E. (1933) The Role of Infiltration in the Hydrological Cycle. *Transactions American Geophysical Union*, **14**, 446–460.
- Huang, S., Pollack, H. K. and Shen, Po-Yu (2000) Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperature. *Nature*, **403**, 756–758.
- Kagabu, M., Shimada, J., Delinom, R., Nakamura, T. and Taniguchi, M. (2013) Groundwater age rejuvenation caused by excessive urban pumping in Jakarta area, Indonesia. *Hydrological Process*, **27**, 2591–2604. doi:10.1002/hyp.9380.
- Zhu, K., Blum, P., Ferguson, G., Balke, K. D. and Bayer, P. (2010) The geothermal potential of urban heat islands. *Environmental Research Letters*, **5** (4), 044002.
- Knorr, W., Prentice, I. C., House, J. I. and Holland, E. A. (2005) Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*, **433**, 298–301.
- Lang, D. J., Wiek, A., Bergmann, M., Stauffacher, M., Martens, P., Moll, P., Swilling, M. and Thomas, C. J. (2012) Transdisciplinary research in sustainability science: practice, principles, and challenges. *Sustainability Science*, **7**, 25–43.
- Manning, R. (1889) On the flow of water in open channels and pipes. *Transactions of Institute of Civil Engineering*, **20**, 161–207.
- Montanari, A., Young, G., Savenije, H. H. G., Hughes, D., Wagener, T., Ren, L. L., Koutsoyiannis, D., Cudennec, C., Toth, E., Grimaldi, S., Blöschl, G., Sivapalan, M., Beven, K., Gupta, H., Hipsey, M., Schaeffli, B., Arheimer, B., Boegh, E., Schymanski, S. J., Di Baldassarre, G., Yu, B., Hubert, P., Huang, Y., Schumann, A., Post, D., Srinivasan, V., Harman, C., Thompson, S., Rogger, M., Viglione, A., McMillan, H., Characklis, G., Pang, Z. and Belyaev, V., (2013) “Panta Rhei—Everything flows”: Change in hydrology and society—The IAHS Scientific Decade 2013–2022. *Hydrological Sciences Journal*. **58** (6), 1256–1275.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Steven K. Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meeh, G. A., Mitchel, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P. and Wilbanks, T. J. (2000) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, **463**, 2010jdoi: 10.1038/nature08823.
- Ostrom, E. (1990) *Governing the Commons*. Cambridge University Press, 295 p.
- Pohl, C. and Hirsch Hadorn, G. (2007) *Principles for designing transdisciplinary research*. Proposed by the Swiss Academies of Arts and Sciences. oekom Verlag, München, 124 p.
- Reynolds, O. (1888) On certain laws relating to the regimen of rivers and estuaries, and on the possibility of experiments on a small scale. The 3rd International Navigation Con-

- gress, Frankfurt.
- Rocha, J. C., Peterson, G. D. and Biggs, R. (2015) Regime Shifts in the Anthropocene: Drivers, Risks, and Resilience. *PLoS ONE* **10** (8): e0134639. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0134639>.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, III, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. and Foley, J. A. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature*, **461**, 472–475, doi:10.1038/461472a.
- Sugimoto, R., Kitagawa, Nishi, S., Honda, H., Yamada, M., Kobayashi, S., Shoji, J., Ohsawa, S., Taniguchi, M. and Tominaga, O. (2016) Phytoplankton primary productivity around submarine groundwater discharge in nearshore coasts. *Marine Ecology Progress Series*. DOI: 10.3354/meps11980.
- Sutherland, W. J., Armstrong-Brown, S., Armsworth, P. R., Tom, B., Brickland, J., Campbell, C. D., Chamberlain, D. E., Cooke, A. I., Dulvy, N. K., Dusic, N. R., Fitton, M., Freckleton, R. P., Godfray, H. C. J., Grout, N., Harvey, H. J., Hedley, C., Hopkins, J. J., Kift, N. B., Kirby, J., Kunin, W. E., MacDonald, D. W., Marker, B., Naura, M., Neale, A. R., Oliver, T., Osborn, D., Pullin, A. S., Shardlow, M. E. A., Showler, D. A., Smith, P. L., Smithers, R. J., Solandt, J., Spencer, J., Spray, C. J., Thomas, C. D., Thompson, J., Webb, S. E., Yalden, D. W. and Watkinson, A. R. (2006) The identification of 100 ecological questions of high policy relevance in the UK, *Journal of Applied. Ecology*, **43** (4): 617–627.
- Taniguchi, M., Burnett, W. C., Cable, J. E. and Turner, J. V. (2002) Investigation of submarine groundwater discharge. *Hydrological Processes*, **16**(11), 2115–2129.
- Taniguchi, M. (2011): Groundwater and Subsurface Environments—Human Impacts in Asian Coastal Cities—. Springer, 312 p.
- Taniguchi, M., Endo, A., Gurdak, J. J. and Swarzenski, P. (2017) Water-Energy-Food Nexus in the Asia-Pacific Region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **11**, 1–8.
- Tapley, B. D., Chambers, D. P., Bettadpur, S. and Ries, J. C. (2003) Large scale ocean circulation from the GRACE GGM01 Geoid. *Geophysical Research Letters*, **30**, 2163, doi:10.1029/2003GL018622, 22.
- Tóth, J. (1963) A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, **68**(16), 4795–4812.
- van Vliet, M. T. H., Wiberg, D., Leduc, S. and Riahi, K. (2016) Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. *Nature Climate Change*, **6**, 375–381.
- Yamada, M., Shoji, J., Ohsawa, S., Mishima, T., Hata, M., Honda, H., Fujii, M. and Taniguchi, M. (2017) Hot spring drainage impact on fish communities around temperate estuaries in southwestern Japan. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **11**, 69–83.

原稿受付：2018年4月 5 日

原稿受理：2018年6月15日

この論文に対する「討論」を2019年6月30日まで受け付けます。

水文学の課題と未来：学際研究と超学際研究の視点から

谷口 真人^{1*}

要 旨

水文学の課題と未来について、学際研究と超学際研究の視点からレビューと概説をおこなった。学際研究には、シームレスに循環する水を扱う学術分野の不連続を埋める学際研究と、同じ水文現象を異なる学術分野から統合的に捉える学際研究の2種類がある。一方超学際研究については、持続可能な社会のための国際研究プラットフォームのフューチャー・アースと、国際水文科学協会のパンタレイ（万物は流転する）を例に、価値観や利害関係の大きい「厄介な問題」に対する水文学の取り組みと、戦略的研究課題の抽出などステークホルダーとの協働企画・協働実施・協働実装について概説した。また将来の水文学の課題として、システム知の構築にはネクサス研究や持続可能性指標研究等が、目標知の構築には、将来の目標から道筋と条件を分析するバックキャスト・シナリオやフューチャー・デザイン等が、社会変革知の構築には人間行動心理や技術革新による経済と環境の影響評価、閾値（ティッピングポイント）・状態遷移（レジームシフト）・レジリエンスなどの重要性が指摘された。

キーワード：社会の中の科学，超学際，戦略的研究課題，フューチャー・アース，ネクサス